

钢-ECC-UHPC叠合板组合梁抗弯性能分析

谭岳¹, 张祐祯², 姬勇刚³, 周大兴⁴, 国庆闯⁴, 曹康建³, 潘可明⁵, 李家和³, 许维炳^{1*}

¹北京工业大学建筑工程学院, 北京

²华北电力大学水利与水电工程学院, 北京

³云南省交通投资建设集团有限公司, 云南 昆明

⁴中铁建设集团有限公司, 北京

⁵北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京

收稿日期: 2026年4月19日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月20日

摘要

为提升钢-混组合梁的抗弯力学性能, 改善主梁开裂、耐久性不足等问题, 将工程水泥基复合材料(ECC)及超高性能混凝土材料(UHPC)引入到钢-混组合梁中, 并基于ABAQUS展开了钢-ECC-UHPC叠合板组合梁缩尺模型仿真分析, 探究了桥面板厚度和配筋率对其抗弯性能的影响。结果表明: 试件呈现以钢梁屈曲失效为主导的延性破坏模式, 变形集中于跨中加固区两侧, 而ECC-UHPC叠合板协同工作性能优异, 有效延缓了桥面板应力集中。增大桥面板厚度可提升组合梁抗弯性能, 当厚度由80 mm增至100 mm时, 屈服荷载与极限承载力分别提高4.2%和3.9%; 提高配筋率同样效果显著, 当配筋率由1.18%增至3.27%时, 屈服荷载与极限荷载分别提升10.3%和15.8%。

关键词

桥梁工程, 钢-混组合梁, 叠合板, 超高性能材料, 抗弯性能

Flexural Performance Analysis of Steel-ECC-UHPC Composite Slab Composite Beams

Yue Tan¹, Youzhen Zhang², Yonggang Ji³, Daxing Zhou⁴, Qingchuang Guo⁴, Kangjian Cao³, Keming Pan⁵, Jiahe Li³, Weibing Xu^{1*}

¹College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²School of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, North China Electric Power University, Beijing

³Yunnan Transportation Investment and Construction Group Co., Ltd., Kunming Yunnan

⁴China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing

*通讯作者。

文章引用: 谭岳, 张祐祯, 姬勇刚, 周大兴, 国庆闯, 曹康建, 潘可明, 李家和, 许维炳. 钢-ECC-UHPC叠合板组合梁抗弯性能分析[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 249-257. DOI: 10.12677/hjce.2026.155135

Abstract

To improve the flexural mechanical performance of steel-concrete composite beams and address issues such as cracking and insufficient durability of the main beam, engineered cementitious composite (ECC) and ultra-high performance concrete (UHPC) were introduced into steel-concrete composite beams. A scaled model simulation of a steel-ECC-UHPC composite slab composite beam was conducted using ABAQUS to investigate the effects of slab thickness and reinforcement ratio on its flexural performance. The results show that the specimen exhibits a ductile failure mode dominated by buckling failure of the steel beam, with deformation concentrated on both sides of the mid-span reinforcement zone. The ECC-UHPC composite slab demonstrates excellent collaborative performance, effectively delaying stress concentration in the slab. Increasing the slab thickness enhances the flexural performance of the composite beam. When the thickness increases from 80 mm to 100 mm, the yield load and ultimate bearing capacity increase by 4.2% and 3.9%, respectively. Increasing the reinforcement ratio also significantly improves flexural performance. When the reinforcement ratio increases from 1.18% to 3.27%, the yield load and ultimate load increase by 10.3% and 15.8%, respectively.

Keywords

Bridge Engineering, Steel-Concrete Composite Girder, Laminated Slab, Ultra-High Performance Materials, Flexural Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢-混组合梁桥结构通过剪力连接件将钢材和混凝土材料更好的粘接到一起,使二者协同工作,充分发挥了钢材和混凝土材料的优点,极大提升了组合梁桥的抗压、抗拉性能[1],同时具有结构自重、造价低,结构耐久性良好等优点[2]。然而,传统的混凝土材料的极限拉应变较低,极大的限制了组合梁在复杂恶劣环境中的应用[3]。

工程水泥基复合材料(ECC)及超高性能混凝土(UHPC)等新材料的引入极大的改善桥面板负弯矩区开裂的情况[4]。由 Li 等人提出并研究的 ECC 材料具有高延性、高韧性、裂缝细密发展的优点[5]。由 Larrard [6]教授提出的 UHPC 材料比普通混凝土材料具有更高的抗拉、抗压强度以及耐久性[7]。上述材料特性显著提升了组合结构的抗裂、抗震性能以及耐久性。尽管钢-混凝土组合梁以及高性能水泥基材料在桥梁工程中的应用研究已取得一定进展,但多集中于单一高性能材料的加固或局部替换,较少考虑 ECC 与 UHPC 复合叠合后的协同受力机制。

鉴于此,本文将工程水泥基复合材料(ECC)及超高性能混凝土材料(UHPC)引入到钢-混组合梁中,并基于 ABAQUS 展开了钢-ECC-UHPC 叠合板组合梁缩尺模型仿真分析,探究了桥面板厚度和配筋率对其抗弯性能的影响。相关成果可为该类新型组合梁研发应用提供借鉴。

2. 数值模型建立

2.1. 模型参数

本文依托于现有实际钢-混组合梁桥, 实桥尺寸长 \times 宽 \times 高为 $25\text{ m}\times 16\text{ m}\times 2.65\text{ m}$ 。按照 $1:5$ 的缩尺比例建立缩尺模型, 缩尺前后组合梁配筋率保持 2.10% 不变。缩尺后模型梁总长度为 3550 mm , 总宽度为 660 mm , 总高度为 511 mm ; 下部工字钢梁上翼缘板宽 150 mm 。厚度为 8 mm , 腹板高度为 415 mm , 厚度为 6 mm , 下翼缘板宽度为 160 mm , 厚度为 8 mm 。在两侧及加载点附近加密布置 4 mm 厚的横向加劲肋, 在下翼缘板附近布置 4 mm 厚的纵向加劲肋。桥面板总厚度为 80 mm (其中 ECC 厚度 50 mm , UHPC 层厚度 30 mm)。图 1 给出了组合梁的具体构造。

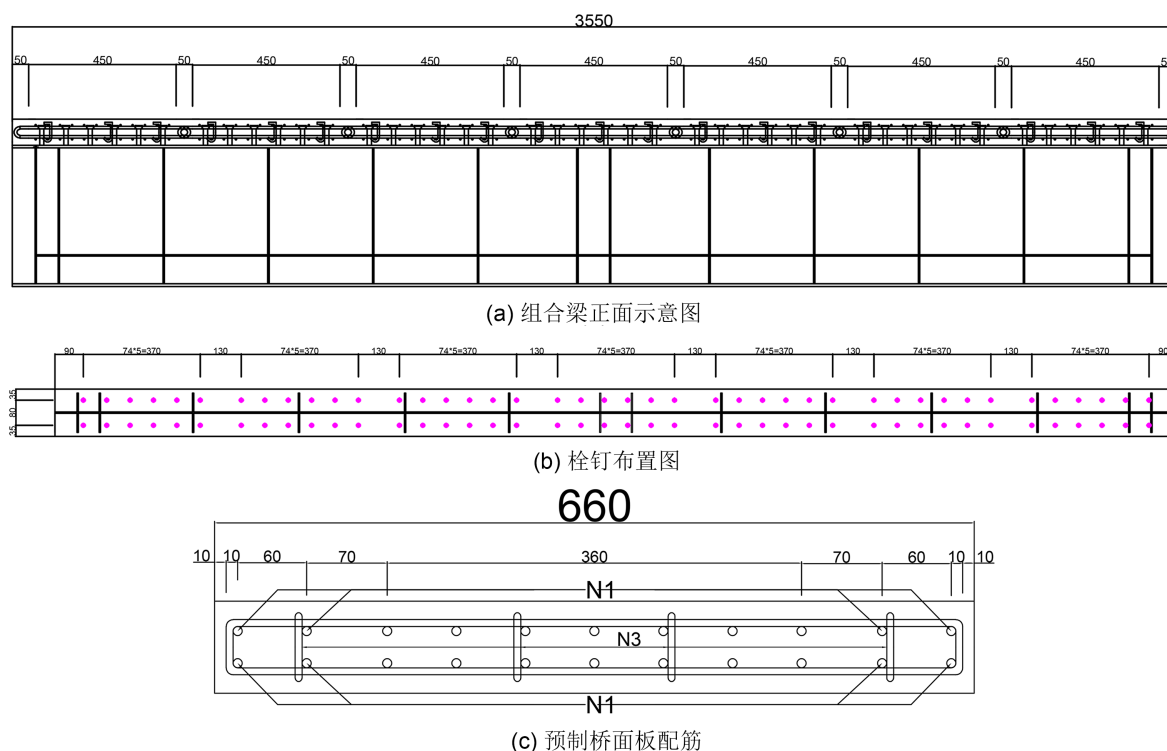


Figure 1. Test beam parameters

图 1. 试件参数

2.2. 网格划分

桥面板、钢主梁以及栓钉均采用八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R), C3D8R 单元可以忽略组合梁受弯时网格变形对计算分析的影响从而取得较为精准的数据结果, 以保证模拟结果的可靠性。由纵向受力钢筋和横向分布钢筋绑扎而成的钢筋笼主要承受轴向拉应力, 均采用三维两节点桁架单元(T3D2)进行模拟。最终确定预制桥面板网格尺寸为 25 mm , 钢主梁网格尺寸为 30 mm , 栓钉网格尺寸为 10 mm , 垫块网格尺寸为 50 mm 。

2.3. 分析步设置

为探讨叠合板组合梁负弯矩区抗弯性能, 本文模拟加载方式为三点弯曲静力加载, 模拟中模型分析步选择静力, 通用模式, 初始增量步设置为 0.0001 , 最小增量步设置为 $1\text{e}-5$, 最大增量步为 0.1 , 并激活

几何非线性计算，输出结果包含但不限于位移、反作用力以及混凝土受拉损伤。

2.4. 材料参数

(1) ECC 材料本构

图 2 给出的 ECC 材料受拉及受压本构采用 Dan Meng [8]等人提出的应力 - 应变曲线:

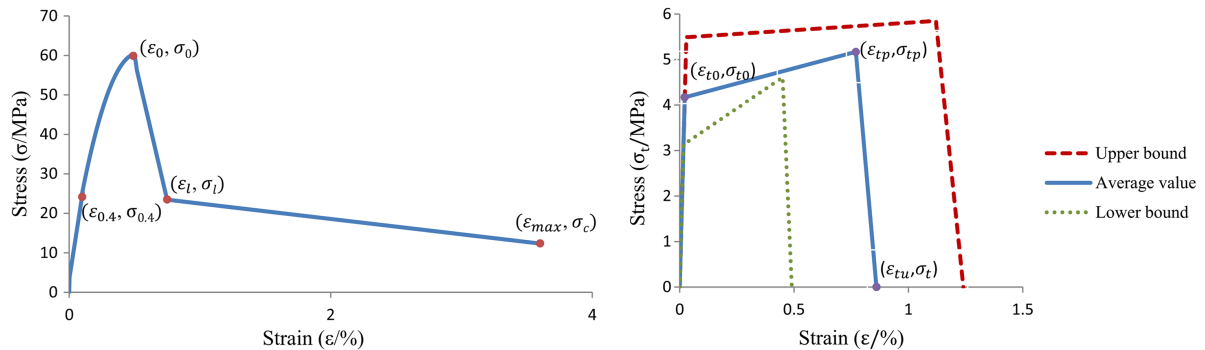


Figure 2. Constitutive model of ECC [8]

图 2. ECC 本构[8]

(2) UHPC 材料本构

图 3 给出的 UHPC 材料则采用杨剑[9]等人提出的应力 - 应变曲线作为受压本构模型，采用张哲[10]等人提出的应力 - 应变关系曲线作为受拉本构:

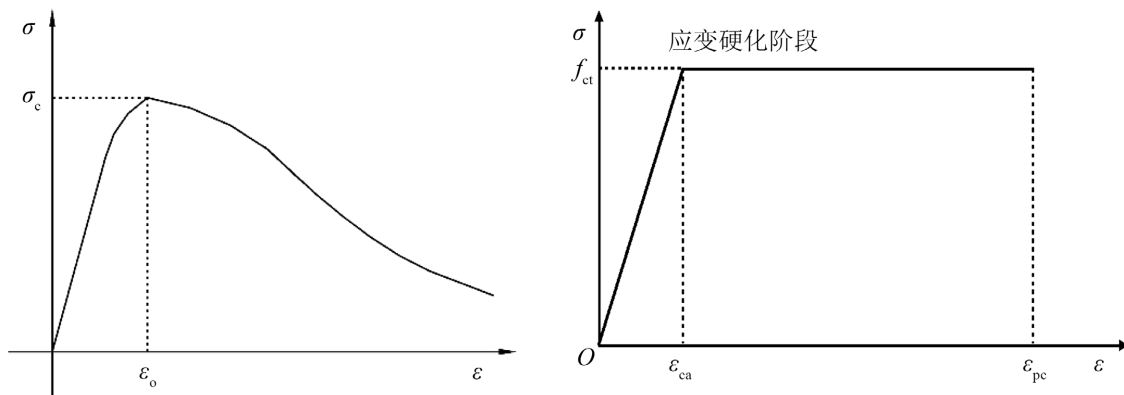


Figure 3. Constitutive model of UHPC [9] [10]

图 3. UHPC 本构[9] [10]

(3) 钢材本构

钢筋和下部钢梁的本构则均采用双折线模型本构,最终确定 HRB400 钢筋屈服强度和抗拉强度为 460 MP、620 MPa, Q420 钢材屈服强度和抗拉强度确定为 430 MPa、560 MPa。

2.5. 材料参数

钢筋笼内置于预制桥面板内部，两者间采用 Embedded (嵌入约束)以实现协同受力；栓钉根部圆形截面与钢主梁上翼缘采用 Tie (绑定约束)，栓钉其余区域与预制桥面板之间亦采用 Embedded 约束；钢主梁上翼缘与预制桥面板之间建立 Surface-to-surface contact (面 - 面接触)，切向采用罚函数(摩擦因数 0.3)，

法向采用硬接触；为模拟预制桥面板中 ECC 层与 UHPC 层之间的粘结滑移，两者间采用库仑摩擦接触，切向为罚函数(摩擦因数 0.15)，法向为硬接触且允许接触后分离；跨中加载梁及两端加载垫块与组合梁之间均采用 Tie 约束，并在加载梁和加载垫块外表面分别设置参考点，通过 Coupling (耦合约束)将表面所有自由度耦合至各自对应的参考点。

3. 模拟结果

3.1. 破坏模式

图 4 给出了模拟所得组合梁桥面板和钢梁破坏模式：

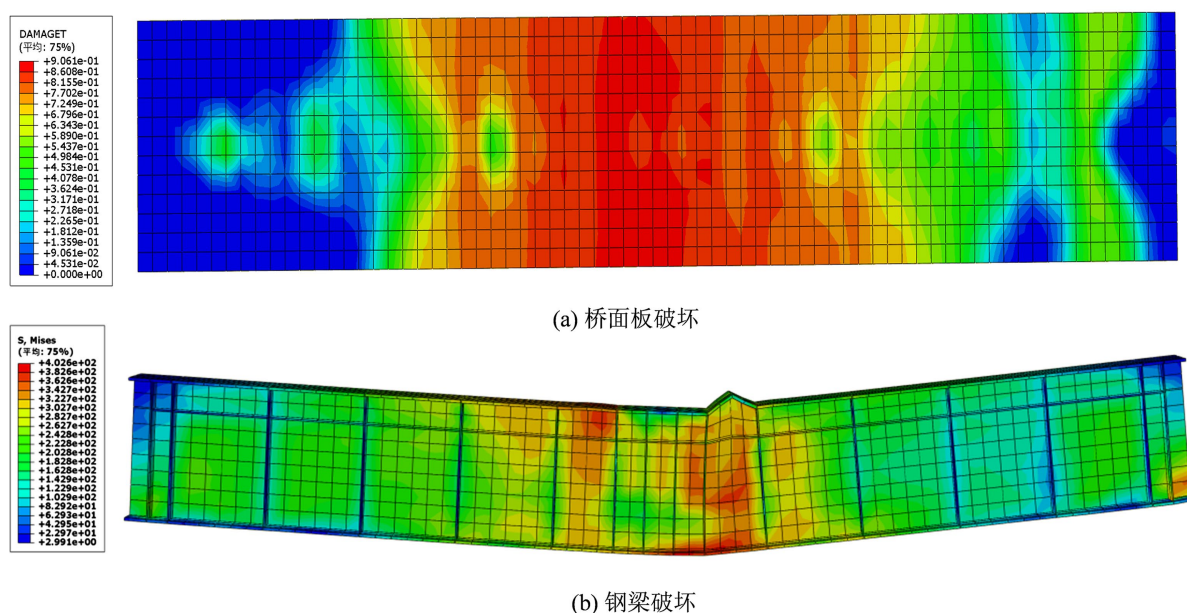


Figure 4. Composite beam failure

图 4. 组合梁破坏

模拟结果显示组合梁的破坏模式表现为以钢梁屈曲破坏为主导的破坏模式。根据损伤云图，桥面板的主裂缝出现在板顶负弯矩区位置，应力水平自负弯矩区中心位置处向两侧支座处逐渐递减，整体分布均匀。在最终破坏阶段，桥面板的损伤因子均超过 0.9。加载过程中，钢主梁在跨中区域加劲肋布置密集的位置发生显著的鼓起变形，该处应力水平明显高于相邻区域，并向两侧递减。破坏首先从钢梁下翼缘开始发展，最终在腹板区域形成鼓起屈曲，导致钢梁失效并完全退出工作。

3.2. 荷载 - 位移曲线

图 5 给出了模拟过程中叠合板组合梁荷载 - 位移曲线。

根据图 5 可知整个模拟加载过程可大致划分 4 个加载阶段：1) 弹性响应阶段：在此阶段，试验荷载与组合梁负弯矩区所产生的竖向挠度之间呈线性关系。桥面板混凝土未见明显裂缝，钢梁亦未出现显著屈曲变形。主拉应力由桥面板混凝土与内部钢筋共同承担，试件的整体刚度基本维持不变，维持在 48.7 kN/mm 左右；2) 裂缝演化阶段：随着加载持续进行，桥面板顶面及侧面开始出现裂缝并不断扩展，导致组合梁的整体刚度逐渐下降到了 39.2 kN/mm。裂缝从跨中区域逐步向两端支座方向发展，荷载与位移之间的线性关系被破坏，弹性阶段结束；3) 屈服阶段：钢梁跨中的下翼缘板及腹板区域开始发生局部屈曲，

组合梁刚度急剧降低到 25.3 kN/mm。桥面板内的受拉钢筋进入屈服状态并逐渐退出受力，负弯矩区的主裂缝进一步加宽、加深。试件承载力增速放缓，荷载 - 位移曲线的斜率开始减小；4) 破坏阶段。钢梁局部屈曲持续加剧，腹板、下翼缘板及加劲肋部分均出现鼓曲变形。剪跨段的竖向挠度迅速增大，荷载越过峰值(563 kN)点后曲线转入下降段，试件承载力显著下降。当组合梁的承载力降低至峰值荷载的 75% 时，即认为结构已发生失效。

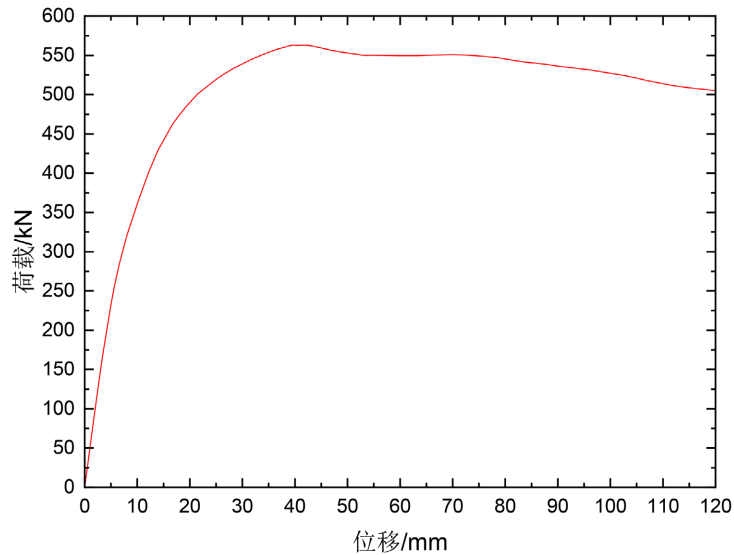


Figure 5. Load-displacement curve
图 5. 荷载 - 位移曲线

3.3. 跨中截面应变

图 6 给出了组合梁跨中截面应变分布图。

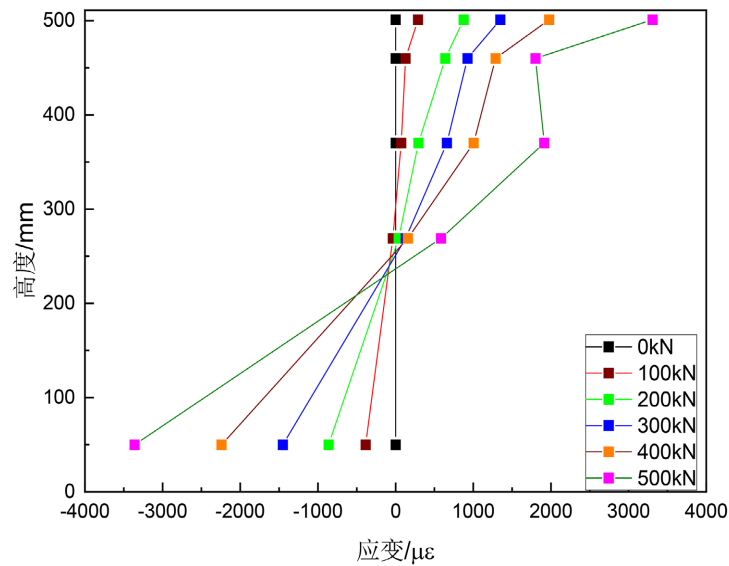


Figure 6. Mid-span cross-section strain distribution
图 6. 跨中截面应变分布

如图 6 所示在组合梁加载全过程中, 跨中截面的应变分布总体上基本符合平截面假定。加载初期, 随荷载增加, 截面应变呈线性且均匀增长, 表明钢主梁、桥面板与叠合板之间处于良好的协同工作阶段, 界面及叠合板层面的黏结滑移可忽略不计。随着荷载进一步增大, 组合梁进入屈服阶段, 各测点应变持续发展, 钢与混凝土交界处开始出现相对黏结滑移, 导致组合梁中性轴高度不断下移, 截面应变逐渐由线性转变为非线性分布。纵观整个加载过程, 跨中截面应变始终未明显偏离平截面假定的基本规律。

4. 参数影响分析

4.1. 桥面板厚度

在保证叠合层厚度比为 $ECC:UHPC = 5:3$ 的情况下改变桥面板总厚度(80 mm、90 mm、100 mm), 探究桥面板厚度对高性能混凝土材料叠合板组合梁力学表现的影响, 并为以后的研究提供一定的参考。图 7 给出了不同桥面板厚度下组合梁的荷载 - 位移曲线:

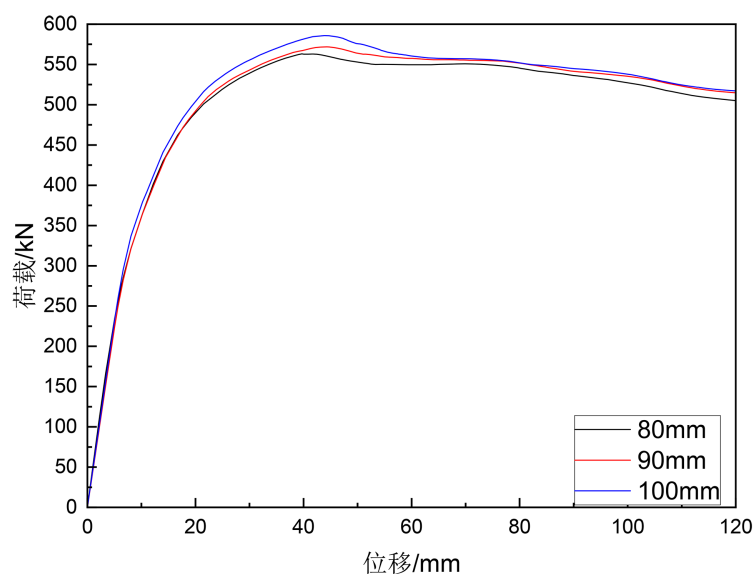


Figure 7. Parametric analysis of bridge deck thickness
图 7. 桥面板厚度参数分析

如图 6 可知当桥面板厚度由 80 mm 增加至 100 mm 时, 组合梁的屈服荷载和屈服位移分别提高了 4.2% 和 4.1%; 峰值荷载由 563 kN 增长至 585 kN, 增幅为 3.9%, 峰值位移则增加了 10.0%; 与此同时, 延性系数略有下降。考虑是因为桥面板厚度增加, 组合梁的整体截面高度增大, 惯性矩显著提高。这使得梁在弹性阶段的抗弯刚度(EI)增大。在相同荷载下, 变形更小; 要使其达到屈服, 就需要更大的荷载, 因此屈服荷载提高。同时板厚增加后, 受拉区 ECC/UHPC 的总厚度增大, 能承受更大的拉力; 同时中性轴向受拉区移动, 使受压钢梁区域更大, 可发挥更高的塑性弯矩。因此峰值荷载也有所上升。

4.2. 配筋率

在不改变钢筋间距等布置形式以及满足最小配筋率的前提下, 设置多组不同钢筋直径(6 mm、8 mm、12 mm)来进一步探究配筋率(1.18%、2.10%、3.27%)对 ECC/UHPC 叠合板组合梁负弯矩区抗弯性能的影响规律。图 8 给出了不同纵筋直径下组合梁的荷载 - 位移曲线:

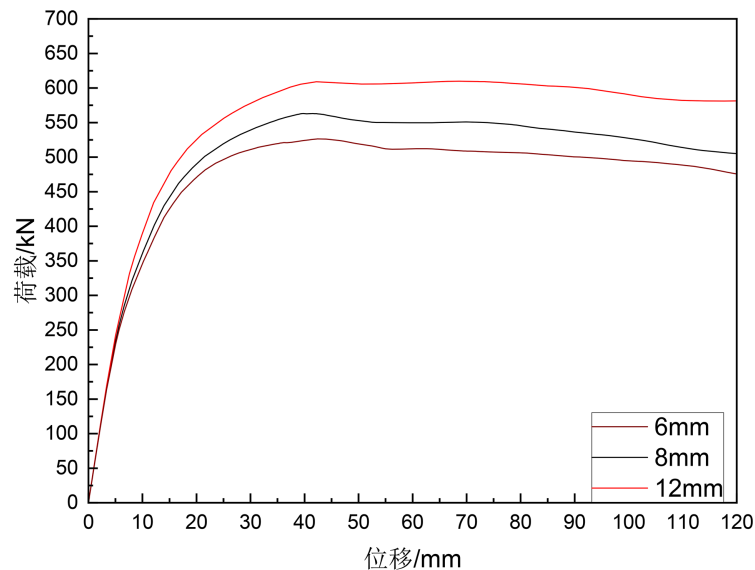


Figure 8. Parameter analysis of reinforcement ratio
图 8. 配筋率参数分析

在加载初期, 配筋率对组合梁的初始刚度影响较小; 但随着配筋率增大, 试件的承载能力得到了显著提升。当配筋率由 1.18% 增至 3.27% 时, 试件的屈服荷载和极限荷载分别提高了 10.3% 和 15.8%。然而, 延性系数与配筋率呈负相关关系, 降幅为 10.6%。由此可见, 桥面板纵筋配筋率是影响 ECC/UHPC 叠合板组合梁抗弯承载性能的关键因素: 配筋率越高, 极限承载力越大, 但延性越差。

5. 结论

本文基于 ABAQUS 对钢-ECC-UHPC 叠合板组合梁展开了三点弯曲加载有限元模拟分析, 主要结论如下:

1) 试件表现为以钢梁屈曲失效为主导的延性破坏模式, 钢梁变形主要集中于跨中加固区两侧, 表现为下翼缘与腹板的显著鼓曲变形, 而加固区范围内始终未出现明显局部变形。ECC-UHPC 叠合板协同工作性能优异, 高韧性与高强度材料的结合极大延缓桥面板应力集中。

2) 桥面板厚度对组合梁的抗弯性能有显著影响, 当桥面板的厚度由 80 mm 增大到 100 mm 时, 组合梁的屈服荷载和极限承载力增幅为 4.2% 和 3.9%。

3) 配筋率增加可以显著提升组合梁的抗弯性能, 当配筋率由 1.18% 增至 3.27% 时, 组合梁的屈服荷载和极限荷载增幅为 10.3% 和 15.8%。

4) 需要指出的是延性系数都与板厚和配筋率参数变化呈现负相关, 实际设计时可以选择合适的配筋率和板厚。

参考文献

- [1] 陈全胜, 侯圣均, 蒋晨晨, 等. 钢-混凝土-ECC 组合梁受弯性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(S1): 136-146.
- [2] 樊健生, 刘入瑞, 张君, 等. 采用混杂纤维 ECC 的叠合板组合梁负弯矩受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 57-67.
- [3] 乔治, 潘钻峰, 梁坚凝, 等. ECC/RC 组合梁受弯性能试验研究与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(4): 724-731.

-
- [4] 武芳文, 左剑, 樊州, 等. 钢-ECC/UHPC 组合梁负弯矩区力学性能研究[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(1): 218-231.
- [5] Li, V.C. and Leung CKY. (1992) Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, **118**, 2246-2264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246))
- [6] Larrard, F.D. and Sedran, T. (1994) Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model. *Cement and Concrete Research*, **24**, 997-1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- [7] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 10-20.
- [8] Meng, D., Huang, T., Zhang, Y.X., *et al.* (2017) Mechanical Behaviour of a Polyvinyl Alcohol Fibre Reinforced Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC) Using Local Ingredients. *Construction and Building Materials*, **141**, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.158>
- [9] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J]. 混凝土, 2008(7): 11-15.
- [10] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.